

波長依存スペckルを用いた単一ファイバイメージングに関する研究

著者	久保田 達也
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	89
号	1
ページ	118-119
発行年	2020-08-31
URL	http://hdl.handle.net/10097/00129004

修士学位論文要約（令和2年3月）

波長依存スペckルを用いた単一ファイバイメージングに関する研究

久保田 達也

指導教員：松浦 祐司

Single fiber imaging by wavelength-dependent speckle illumination

Tatsuya KUBOTA

Supervisor: Yuji MATSUURA

In clinical medicine, the demand for ultra-thin diameter endoscopes is increasing and recently, several types of imaging methods for ultra-thin endoscopes using a single multimode fiber have been proposed. In this thesis, a single-fiber imaging system using wavelength-dependent speckle illumination which is robust to fiber bending is proposed. The system is an all-fiber optics based on a double-clad fiber (DCF). In this system, light from a wavelength tunable laser is coupled to a DCF and a short step-index multimode fiber that is spliced to the DCF generates illumination pattern with speckle structure. The reflected image is estimated by using the compressed image reconstruction. Since this imaging system does not require a lens or scanning system, it is expected to be applied to an ultra-thin endoscope with a diameter of less than 100 μm . The image reconstruction by using proposed system is demonstrated.

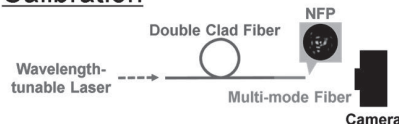
1. はじめに

近年の医療・生物学分野において、低侵襲で細管内部の観察が可能な極細径内視鏡への需要が高まっている。この内視鏡は特に血管・膵管・胆管等の細管内の観察や、組織深部の低侵襲的な観察に利用される。従来、外径1 mm以下の細径な内視鏡としては光ファイババンドルが使用されてきたが、細径化に伴い画質が劣化するという問題を抱えていた¹⁾。我々の研究グループでは、一本の光ファイバを介して取得した線形観測データから画像を再構成するイメージング手法について検討を重ねてきた。今回、全ファイバ光学系の外径125 μm の内視鏡による反射イメージングの結果を示し、本手法の有用性を検証する。

2. 単一ファイバイメージングの原理

図1に測定系の概要を示す。測定にはDCF (Double Clad Fiber) とMMF (Multi-Mode Fiber) を接続した単一ファイバプローブを使用する。照明用の近赤外波長可変レーザ（波長1510～1570 nm）はDCFのコア内をシングルモード伝搬し、MMFを介して出射する。この際、出射光はMMF内におけるモード間干渉の結果としてランダムなスペckル構造となる。撮像の事前段階としてのキャリブレーションではMMF出射端におけるスペckル構造をカメラにより測定する。強度測定ではスペckルを試料に照射した際に生じる反射光が再度MMFへと入射し、DCFの内部クラッドを伝搬後に分岐されPDにて検出される。

Calibration



Measurement of intensity

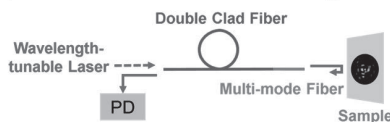


図1. 測定系の概要

撮像は、MMFの出射端近傍界分布(NFP)とPDにおける検出光強度の線形性を利用する。測定に先立ち、試料のない状態で波長を等間隔で掃引し、InGaAsカメラにより観測される各波長におけるNFPを行列 A に格納する。続いてMMF端面を試料面に近接して各波長における反射光強度をベクトル b へ格納する。ここで、求める試料表面の反射光強度分布をベクトル x とすると、下記の線形一次方程式に帰着する。

$$Ax = b \quad (1)$$

測定回数が画素数よりも少ない場合(1)式は劣決定系であるが、許容誤差 ε を与え、下記のTotal Variation最小化問題を解くことにより、近似的に反射像を再構成することができる²⁾。

$$\hat{x} = \min \|x\|_{TV} \text{ subject to } \|Ax - b\|_2 \leq \varepsilon \quad (2)$$

3. シミュレーションによる検討

図1のキャリブレーションの測定系を用いて波長依

存スペckルの観測をおこない、スペckルの相互相関が画像再構成に与える影響を数値シミュレーションにより調べた。はじめに測定数を 100 枚で波長刻み 0.1 nm と 0.6 nm の時の相互相関係数のマッピングを示す。波長刻み 0.1 nm では隣接波長との相互相関係数の平均値は 0.92, 0.6 nm では 0.60 である。

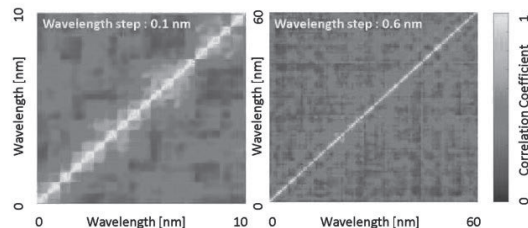


図 2. 波長刻みごとの相互相関係数マッピング

そして、各波長刻みのスペckルを使用して数値シミュレーションをおこなった。ノイズは ± 0 , ± 5 , ± 9 %だけ強度 b に加えた。ノイズ値が ± 0 %の時は波長刻みが 0.1 nm と 0.6 nm の間に画質差は無い。一方、ノイズを加えると波長刻みが 0.1 nm よりも 0.6 nm の方が良画質を保とうとしていることが確認される。この結果から波長刻みが大きいほどノイズに対して精度の高い画像再構成が可能であることがわかる。

	Noise ± 0 %	Noise ± 5 %	Noise ± 9 %
波長刻み 0.1 nm	 SSIM = 0.97	 SSIM = 0.74	 SSIM = 0.57
波長刻み 0.6 nm	 SSIM = 0.98	 SSIM = 0.85	 SSIM = 0.78

図 3. 波長刻みとノイズ値ごとのシミュレーション

4. 反射イメージング

次に反射像の画像再構成の実験をおこなった。測定系を図 4 に示す。光の分岐にはダブルクラッドファイバカプラ(DCFC)を用い、全ファイバ系で構築した。PMF を介して出力された照明光は、光減衰器で強度調整されたのち、DCFC 内をシングルモード伝搬し、MMF(長さ 2 m, コア径 105 μm , NA0.1)へ結合された。試料からの反射光は MMF を逆方向に伝搬し、DCFC により分岐され、透過型の測定と同様に InGaAs カメラを流用して検出された。

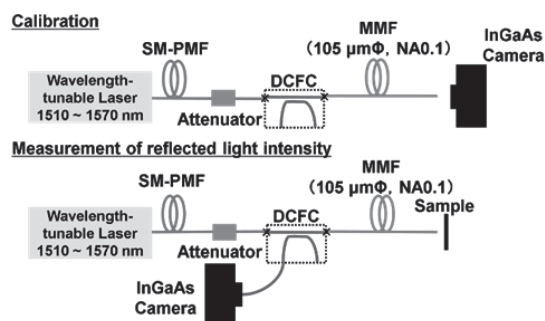


図 4. 反射イメージングの実験系

この測定系を用いて波長刻み 0.6 nm, 測定数 100 枚(波長帯域 60 nm)として測定をおこない反射像の画像再構成を試みた。画像再構成の結果を図 5 に示す。図右は反射強度に ± 13.1 %のノイズを加えた時のシミュレーションである。図より反射像の概形を推定できていることが分かる。今後は反射光強度に含まれるノイズや揺らぎ成分を除去して高画質化を検討する。

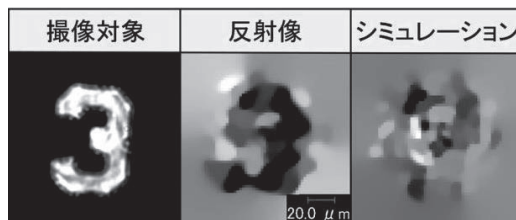


図 5. 反射像の画像再構成

5. まとめ

本研究では全ファイバ系による単一ファイバイメージングシステムを構築し、波長依存スペckル照明による反射像の再構成の実現可能性を検証した。本構成は、先端にレンズ系や走査系が不要であるため、100 μm 以下の極細径内視鏡への応用が考えられる。今後は、反射光強度に含まれる揺らぎを抑制するなど光強度の検出改善に励み高画質化を図ること、MMF の短尺化に努めることが課題となる。

文献

- 1) J. Shin, et al., Opt. Lett. **42**, 109 (2017)
- 2) Deanna Needell et al., SIAM J. Imaging Sci. **6**, 1035 (2013)